

На правах рукописи

**Вашурин Никита Сергеевич**

**ФЕМТОСЕКУНДНОЕ ФОТОННОЕ ЭХО НА ЭКСИТОННЫХ  
СОСТОЯНИЯХ В ТОНКИХ ТЕКСТУРИРОВАННЫХ ПЛЕНКАХ**

Специальность 01. 04. 05 – Оптика

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Йошкар-Ола – 2016

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Поволжский государственный технологический университет» (ПГТУ), г. Йошкар-Ола, на кафедре конструирования и производства радиоаппаратуры

Научный  
руководитель:

Попов Иван Иванович  
доктор физико-математических наук, профессор.

Официальные  
оппоненты:

Наумов Андрей Витальевич,  
доктор физико-математических наук, профессор  
РАН, заместитель директора по науке ФГБУН  
«Институт спектроскопии Российской академии  
наук» (ИСАН), г. Троицк, г. Москва

Ведущая  
организация:

Степанов Андрей Львович,  
доктор физико-математических наук, ведущий  
научный сотрудник, руководитель группы нанооп-  
тики и наноплазмоники ФГБУН «Казанский физи-  
ко-технический институт им. Е.К.Завойского Ка-  
занского научного центра Российской академии  
наук» (КФТИ КазНЦ РАН), г. Казань  
ФГБОУ ВПО "Казанский национальный исследо-  
вательский технический университет им. А.Н. Ту-  
полева-КАИ" (КНИТУ КАИ), г. Казань

Защита состоится «30» июня 2016 г. в 15 ч. 20 мин. на заседании диссертационно-  
го совета Д 212.081.07 при Казанском (Приволжском) федеральном университете  
по адресу: 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 16.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, с контактными данными составивше-  
го отзыв и заверенные печатью организации, просим направлять по адресу:  
420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 16. К(П)ФУ, ученому секретарю диссертаци-  
онного совета Д 212.081.07

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке им.  
Н.И. Лобачевского Казанского (Приволжского) федерального университета.

Автореферат разослан: « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 201\_\_ г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета, д.ф.-м.н.



Камалова Дина Илевна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

В связи с бурным развитием микро- и нанoeлектроники, внедрением новых полупроводниковых материалов и технологических процессов резко возросла актуальность исследования оптических свойств полупроводниковых тонких пленок. Особое внимание уделяется изучению процессов зарождения дефектов кристаллической структуры и их влияния на наблюдаемые оптические свойства кристаллов. Хорошие перспективы для нанoeлектронного приборостроения открывают новые оптические свойства квантовых точек. Традиционно квантовые точки получают посредством варьирования размеров полупроводника, не содержащего в своем составе внутренних дефектов, кроме поверхностных. В настоящее время оптические исследования свойств объектов такого рода вызывают повышенный интерес ученых в различных странах мира из-за возможности возбуждения долгоживущих экситонных состояний и создания квантовых устройств обработки информации [1].

Большой научный интерес в данный момент представляют работы, которые позволяют с помощью методов оптической эхо-спектроскопии регистрировать характеристики динамических процессов, протекающих на этих экситонных состояниях [2]. Данный метод позволяет определять количественные значения однородной и неоднородной ширины спектральной линии экситонных состояний, и также влияния температуры и плотности экситонов на ширину данных линий. Также по величинам однородной и неоднородной ширины можно дать оценку величины экситон-экситонного [3] и экситон-фононного взаимодействия [4]. А изучение оптических и внутренних процессов дефазировки и спада населенности возбужденных носителей в полупроводниковых квантовых точках, но и в частности, в тонких пленках, позволит повысить эффективность изготавливаемых на основе этих материалов квантовых процессоров [5], светодиодов [6], солнечных батарей [7].

В настоящее время изучение экситонных состояний в тонких полупроводниковых пленках с помощью эхо-спектроскопии позволяет оценивать качество чистоты кристаллической решетки [8, 9], оценивать влияние фононного окружения на релаксационные характеристики локализованных экситонных состояний не только в полупроводниках [10], но и в других средах, например, в двумерных диалектогенах металлов [11]. Во всех этих работах используются случаи квантового ограничения для искусственного сближения электронно-дырочной пары и увеличения их силы связи, что позволяет регистрировать их и при комнатной температуре. Вместе с тем существуют полупроводниковые наноразмерные кластерные системы, в которых, напротив, для реализации квантовых эффектов используют дефекты кристаллической решетки полупроводника [12]. Такой наноразмерный кластер представляет собой атомное образование, влияющее на энергетическое состояние, составляющих его компонентов, и на свойства полупроводниковой матрицы. Наноразмерный кластер может быть образован как атомами примесей, атомами собственных компонентов, а также точечными дефектами кристаллической решетки.

Тонкие пленки, изготавливаемые методом магнетронного распыления, представляют собой текстурированную систему, образованную из отдельных кристаллических зерен, отделенных друг от друга аморфной фазой. На границе со-

прикосновения кристаллической и аморфной фазы местами возникают дефектные состояния кристаллической решетки, приводящие к образованию наноразмерных кластеров [13] на этих дефектах. Образование наноразмерных кластеров, состоящих из атомов примеси или точечных дефектов, связано со стремлением системы к состоянию с минимальной свободной энергией. При этом наноразмерный кластер обладает признаками, характерными для квантовых точек.

Применение первичного фотонного эха (ПФЭ) и стимулированного фотонного эха (СФЭ) для исследования таких квантово-размерных объектов позволит получить спектроскопическую информацию, характеризующую динамические процессы, протекающие на экситонных состояниях в наноразмерных кластерах при комнатной температуре как в однослойных пленках, так и на тонкопленочном полупроводниковом переходе. При этом будет возможно оценивать параметры этих кластеров и характер текстурирования тонких пленок. Измерение характерных времен релаксации экситонных состояний даст представление о временном диапазоне, в течение которого возможно функционирование нового класса полупроводниковых приборов, создаваемых на новых физических эффектах [14]. Возможность обнаружения в таких пленках фотонного эха и его свойства в настоящее время не изучены.

Данная работа посвящена исследованию дефектных структур тонких текстурированных пленок, изготовленных методом магнетронного распыления. Проведение исследования с целью обнаружения возможности и условий наблюдения в таких тонких полупроводниковых пленках различных сигналов фотонного эха, исследование роли рекомбинации возбужденных носителей с помощью метода оптической спектроскопии сверхвысокого разрешения на основе фемтосекундного фотонного эха открывают новые возможности для исследования сред такого рода. Ввиду наличия большего числа дефектов имеется возможность наблюдения локализованных экситонов даже при комнатной температуре. Таким образом, тема диссертационного исследования, посвященная обнаружению фемтосекундных сигналов фотонного эха и изучению оптических свойств сигналов фотонного эха и оптических процессов, протекающих в дефектных структурах тонких текстурированных пленок, является актуальной и ее результаты будут широко востребованы современной наукой и техникой.

### **Степень научной разработанности проблемы**

Теоретической базой диссертационного исследования послужили труды отечественных и зарубежных ученых в области фотонного эха (ФЭ) – Копвиллема У.Х., Хан. Г., Самарцева В.В., Евсеева И.В., Зуйкова В.А., Попова И.И., Рубцовой Н.Н., Наумова А.В.

Для интерпретации полученных результатов использовались труды ученых по наблюдению ФЭ при возбуждении экситонов и трионов в квантово-размерных объектах – О. Roslyak, G. Gumbs, Anne E. Colonna, Xiujuan Yang, T. Kuroda, F. Minami, K Takemoto, B.-R Hyun, L. Langer, I. A. Akimov, M. Bayer.

Вместе с тем, несмотря на значительное число публикаций по вопросам формирования сигналов ФЭ в различных средах, изучению дефектных структур различными методами, аспекты применения метода ФЭ для изучения дефектных структур исследованы недостаточно полно. Остается неизученным вопрос влияния условий локализации входящих в наноразмерный кластер возбуждаемых частиц, представленных дефектами кристаллической структуры полупроводни-

ков, на формирование сигналов фотонного эха.

**Объект исследования** – локализованные суперпозиционные экситонные состояния в тонких текстурированных пленках.

**Предмет исследования** – поиск оптимальных условий возбуждения и регистрации фемтосекундного фотонного эха на локализованных суперпозиционных экситонных состояниях в тонких текстурированных пленках.

**Целью работы** является экспериментальное обнаружение фотонного эха на локализованных экситонных состояниях при комнатной температуре в текстурированных тонких пленках, полученных методом магнетронного распыления, и исследование его свойств.

Цель работы достигается решением следующих **задач**:

1. Определение условий возбуждения в однофотонном и двухфотонном режиме и регистрации фемтосекундных сигналов фотонного эха на экситонных состояниях, локализованных на дефектах кристаллической решетки в составе образованных из них наноразмерных кластеров.

2. Разработка методик определения релаксационных характеристик резонансной среды по спаду интенсивности сигналов первичного фотонного эха и стимулированного фотонного эха при увеличении соответствующего временного интервала между возбуждающими импульсами на фоне сигналов самодифракции (СД) и четырехволнового смешения (ЧВС).

3. Установление связи времен необратимой поперечной релаксации  $T_2$  локализованных экситонных состояний с характеристиками текстурированной тонкой пленки.

4. Установление связи времени необратимой продольной релаксации  $T_1$  с характеристиками процессов, протекающих на тонкопленочном полупроводниковом р-п переходе.

**Методология и методы исследования**: экспериментальные методы исследования тонких текстурированных пленок методом фемтосекундного фотонного эха, методы математической обработки результатов экспериментальных исследований, методы зондовой микроскопии поверхности пленок.

**Научная новизна** работы состоит в следующем:

Впервые обнаружены сигналы ПФЭ и СФЭ на экситонных состояниях, локализованных на дефектах кристаллической решетки текстурированных тонких пленок. Путем регистрации фемтосекундных эхо-сигналов при комнатной температуре установлено отсутствие полного спектрального размытия квантовых уровней экситона, что показало наличие свойств квантово-размерных объектов у наноразмерных кластеров, образованных дефектами кристаллической решетки, на которых происходила локализация возбуждаемых экситонных состояний.

Предложены методики регистрации релаксационных характеристик экситонных состояний по спаду интенсивности сигналов ПФЭ и СФЭ при увеличении временного интервала между соответствующими возбуждающими импульсами, исключающие влияние сигналов самодифракции и четырехволнового смешения, распространяющихся в одном и том же направлении с соответствующим эхо-сигналом, на результаты регистрации. С помощью ПФЭ измерено время необратимой поперечной релаксации  $T_2$ , составившее для пленок ZnO толщиной 800 нм –  $130 \pm 30$  фс, для трехслойной пленки ZnO/Si(P)/Si(B) –  $1900 \pm 320$  фс. С помощью СФЭ измерено время необратимой продольной релаксации  $T_1$ , соста-

вившее в пленках толщиной 100 нм:  $4300 \pm 690$  фс – в ZnO,  $280 \pm 50$  фс – в Si(B),  $670 \pm 120$  фс – в Si(P).

Впервые показана связь времен необратимой поперечной релаксации  $T_2$  локализованных экситонных состояний с характеристиками текстурированной тонкой пленки. При этом наблюдалось увеличение времени необратимой поперечной релаксации  $T_2$  из-за уменьшения плотности экситонных состояний, локализованных на каждом дефекте кристаллической структуры. Уменьшение плотности этих состояний происходило из-за увеличения количества этих дефектов у более тонких пленок, так как количество экситонов, возбуждаемых лазерным излучением с фиксированными параметрами лазерного излучения, не изменялось.

Впервые показана связь времени необратимой продольной релаксации  $T_1$  с характеристиками процессов, протекающих на тонкопленочном полупроводниковом р-п переходе. Установлено, что время необратимой продольной релаксации  $T_1$  тонкой текстурированной пленки меньше значения времени  $T_1$  этой пленки такой же толщины в составе тонкопленочного р-п перехода. Это связано с диффузией зарядов на этом р-п переходе и последующим разрывом связей кулоновского притяжения дырки и электрон в некоторых экситонах, что приводит к уменьшению концентрации экситонных состояний и, соответственно к увеличению времени релаксации  $T_1$ .

### **Теоретическая и практическая значимость работы**

Показаны новые перспективы применения ФЭ, связанные с определением величины времен необратимой поперечной релаксации  $T_2$  и необратимой продольной релаксации  $T_1$  суперпозиционных экситонных состояний, локализованных на дефектах кристаллической решетки, при комнатной температуре в тонких текстурированных пленках, получаемых методом магнетронного распыления. К ним относятся создание новых методов контроля параметров наноразмерных кластеров, сформированных на дефектах тонких текстурированных пленок и обладающих свойствами квантовых точек. Открывается возможность создания нового класса полупроводниковых экситонных приборов для оптической регистрации и обработки информации на основе ФЭ. Также результаты этих спектроскопических исследований могут быть положены в основу оценки технологических режимов получения тонких пленок, включающих наноразмерные кластеры, обладающие свойством квантовых точек, и для разработки методик контроля подвижности зарядов на полупроводниковых переходах текстурированной трехслойной структуры. Полученные результаты внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВПО «Поволжский государственный технологический университет» по специальности «Электроника и нанoeлектроника» в учебном курсе «Физические основы нанофотоники».

**Реализация результатов работы.** Результаты диссертационной работы использованы при выполнении грантов РФФИ № 06-02-16416-а, № 12-02-00736-а, при разработке заявок на грант РНФ и проектов на Международной научной школе «Наука и инновации», внедрены в учебный процесс кафедры конструирования и производства радиоаппаратуры при подготовке специалистов по специальности «Электроника и нанoeлектроника» для контроля качества полупроводниковых пленок наноразмерной толщины, использующихся при разработке новых нанoeлектронных приборов.

### **Достоверность полученных результатов.**

Достоверность полученных результатов и обоснованность выводов подтверждаются многократными исследованиями с проведением повторных оптических измерений по основным положениям работы, выполненным в Фемтосекундном центре коллективного пользования СПбНИУ ИТМО и в Лаборатории фемтосекундной лазерной спектроскопии К(П)ФУ, а также сходимостью результатов, полученных различными методами оптической спектроскопии; их соответствием результатам, полученным другими авторами; непротиворечивостью экспериментальных результатов известным теоретическим положениям.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. На локализованных суперпозиционных экситонных состояниях текстурированных тонких пленок возможно двухфотонное возбуждение и регистрация ПФЭ при комнатной температуре и измерение времени необратимой поперечной релаксации  $T_2$ .

2. На локализованных суперпозиционных экситонных состояниях текстурированных тонких пленок возможно однофотонное и двухфотонное возбуждение и регистрация СФЭ при комнатной температуре и измерение времени необратимой продольной релаксации  $T_1$ .

3. При уменьшении толщины текстурированной пленки ZnO с 800 до 600 нм время необратимой поперечной релаксации  $T_2$  локализованного экситонного состояния увеличивается с  $130 \pm 30$  фс до  $320 \pm 60$  фс.

4. При включении текстурированной пленки ZnO толщиной 100 нм в состав трехслойной полупроводниковой структуры ZnO/Si(P)/Si(B) время необратимой продольной релаксации  $T_1$  локализованного в ней экситонного состояния увеличивается с  $4300 \pm 690$  фс до  $13000 \pm 1900$  фс.

### **Личный вклад автора**

Автором лично получены результаты, представленные в диссертации и публикациях, также разработана и изготовлена экспериментальная установка, на которой им были произведены все исследования. Соискатель принимал непосредственное участие в анализе и обсуждении полученных результатов, написании статей и представлении докладов на конференциях.

### **Апробация работы**

Результаты диссертации докладывались на Международной молодежной научной школе «Когерентная оптика и оптическая спектроскопия – 2011, 2012, 2013, 2014, 2015» (Казань, КФУ), Всероссийской школе-семинар «Волновые явления в неоднородных средах» 2012, 2013, 2014, 2015 (Москва, МГУ), Международной научной школе «Наука и инновации – 2011, 2012, 2013, 2014, 2015» (Йошкар-Ола, ПГТУ), X международном симпозиуме по фотонному эхо и когерентной спектроскопии (2013, Йошкар-Ола, ПГТУ), Международной конференции «Фундаментальные проблемы оптики» (2012, 2014, Санкт-Петербург, НИУ ИТМО), «Инженерные кадры-будущее инновационной экономики России» (2015, Йошкар-Ола, ПГТУ).

### **Публикации**

Основное содержание диссертации опубликовано в 42 научных публикациях, среди которых имеются 12 статей в реферируемых журналах, рекомендуемых ВАК МОН РФ для публикации материалов кандидатских диссертаций, в том числе 5 статей - в зарубежных журналах, входящих в международную базу научного

цитирования «Scopus».

#### **Соответствие диссертации научной специальности**

Диссертация соответствует специальности 01.04.05 «Оптика». Обнаружение сигналов фотонного эха и регистрация времени необратимой поперечной релаксации в тонких текстурированных пленках соответствует п. 5 «Люминесценция. Излучение и поглощение света изолированными и взаимодействующими атомами и молекулами. Источники света. Физические основы методов и техники спектроскопии. Лазерная спектроскопия, оптические прецизионные измерения и стандарты, спектроскопия одиночных атомов» паспорта специальности.

#### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы. Общий объем диссертации – 143 страниц, включая 60 рисунков, 1 таблицу. Библиографический список содержит 165 наименований.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** кратко освещено современное состояние исследований по теме диссертации и обоснована ее актуальность, сформулированы цели работы и основные положения, выносимые на защиту, отмечена научная новизна и практическая ценность полученных результатов, кратко изложено содержание диссертации.

**В первой главе** дано общее представление о явлении ФЭ. Представлены условия формирования сигналов ПФЭ и СФЭ в полупроводниковых структурах. Дается обзор литературы о методах возбуждения сигналов ФЭ, в том числе о режимах однофотонного и двухфотонного возбуждения, и по современному состоянию спектроскопических исследований тонких полупроводниковых пленок оксида цинка, кремния, легированного бором, кремния, легированного фосфором, и гетероструктур. Обосновывается представление резонансной среды в виде экситонного газа.

**Во второй главе** диссертации произведен выбор и обоснование тонких текстурированных полупроводниковых пленок, имеющих волокнисто-кристаллическую структуру. Показано, что в этих пленках при комнатной температуре возможно формирование сигналов ФЭ на экситонах, локализованных на высококонцентрированных примесных дефектах. Для свободных экситонов, возбуждаемых в полупроводниках, характерно малое время жизни из-за их рекомбинации. Условием увеличения их времени жизни является локализация на структурных дефектах. Время их жизни оценивается путем измерения времен необратимых продольной и поперечной релаксаций  $T_1$  и  $T_2$ . Исследуемые в диссертации текстурированные пленки состояли из кристаллических волокон диаметром от 10 до 100 нм, пространство между которыми заполнено аморфной фазой. На границе раздела кристаллической и аморфной фаз происходит изменение связей между атомами и появляются точечные дефекты кристаллической решетки в виде вакансий и межузельных атомов. Появление таких дефектов у кристаллической решетки приводит к возникновению энергетических уровней внутри запрещенной зоны. Объединение точечных дефектов приводил к образованию наноразмерных кластеров с размерами меньше 100 нм, пространственно- и энергетически ограниченных бездефектной кристаллической решеткой. Однородное уширение резонансной спектральной линии локализованных экситонов обеспечивалось за счет



экситон-фононных и экситон-экситонных взаимодействий внутри наноразмерной структуры с внутренними связями между дефектами, характерными для микрокластера. Неоднородное ее уширение обеспечивалось за счет разброса размеров этих наноразмерных структур и конфигурации в них внутренних связей между дефектами. Таким образом, было выполнено одно из условий формирования ФЭ, наличие неоднородного уширения спектра резонансного перехода. Пространственное ограничение локализованной волновой функции экситона внутри кластера на дефектах кристаллической решетки с его размерами близкими к тем, на которых могут проявляться квантовые эффекты ограничения, обеспечивает этим наноразмерным кластерам энергетические свойства характерные для квантовых точек.

Показаны особенности возбуждения фемтосекундных сигналов ФЭ на локализованных экситонных переходах в квантово-размерных кластерных дефектах, содержащихся в тонких текстурированных пленках. Одной из таких особенностей является режим двухфотонного возбуждения эхо-сигнала в текстурированной пленке оксида цинка. Возбуждение линий свободных экситонов с энергией 3,17 эВ происходило путем подачи возбуждающего излучения с энергией в пределах 1,58-1,5 эВ. Спектр лазерных импульсов длительностью 60 фс позволял возбуждать всю неоднородно уширенную линию экситонов, которые сразу после возникновения локализовались на расположенных в запрещенной зоне уровнях дефектов кристаллической решетки атомов, входящих в наноразмерные кластеры тонких текстурированных пленок.

Дано описание экспериментальной установки для обнаружения эхо-сигналов и спектроскопических исследований тонкопленочной текстурированной резонансной среды. Она позволяет обеспечить условия формирования сигнала ПФЭ и СФЭ в тонких текстурированных полупроводниковых пленках и их регистрации после поступления мощных возбуждающих импульсов, дискретно изменять интервал между возбуждающими импульсами с точностью порядка 7 фс с помощью линейного транслятора с шаговым двигателем, имеющим минимальный шаг хода 2 мкм. На созданной экспериментальной установке возможно производить следующие измерения:

- регистрировать среднюю мощность сигналов ФЭ и возбуждающих лазерных импульсов;
- снимать зависимость средней мощности эхо-сигнала от временных интервалов между возбуждающими импульсами.

В **третьей главе** сообщаются результаты регистрации сигналов фемтосекундного ФЭ, формирующегося в двухфотонном режиме возбуждения. Для этого была разработана методика проведения эксперимента, выбрана резонансная среда в виде тонкой текстурированной полупроводниковой трехслойной пленки  $\text{ZnO/Si(P)/Si(B)}$ , состоящей из трех пленок толщиной по 100 нм. Выполнено условие для величины импульсной площади возбуждающих лазерных импульсов, соизмеримой со значением  $\pi/2$ . Обеспечено изменение временного интервала между возбуждающими импульсами от 0 до значений, многократно перекрывающих длительность возбуждающих импульсов. Были выбраны условия пространственного синхронизма, характерные для ПФЭ. В работе показано первое экспериментальное обнаружение фемтосекундного ПФЭ, формирующегося в двухфотонном режиме возбуждения на экситонных переходах, локализованных

на поверхностных дефектах атомов пленки, входящих в наноразмерные кластеры тонкой текстурированной полупроводниковой трехслойной пленки ZnO/Si(P)/Si(B). К тому же, это обнаружение выполнено при комнатной температуре. Для этого была разработана методика регистрации и проведены экспериментальные измерения. Трехслойная пленка выбрана в силу того, что в ней в меньшей степени сказывается эффект затухания эхо-сигнала от сбоя фазы поляризации соседних возбужденных экситонов, благодаря снижению числа упругих столкновений частиц, имеющих суперпозиционное экситонное возбужденное состояние, за счет рекомбинации носителей зарядов, диффундировавших на p-n переходе. Для пленки ZnO, входящей в состав трехслойной пленки использовался двухфотонный режим возбуждения, поскольку не было разрешенного перехода на частоте поглощения возбуждающего лазерного излучения с центральной длиной волны 800 нм. Такой режим возбуждения обеспечивал перекрытие всей неоднородной ширины экситонного уровня. Изображение падающих на экран, установленного позади резонансной среды, когерентных сигналов в направлении вытекающих из условий пространственного синхронизма для ПФЭ ( $\vec{k}_{ПФЭ1} = 2\vec{k}_2 - \vec{k}_1$ ,  $\vec{k}_{ПФЭ2} = 2\vec{k}_1 - \vec{k}_2$ ) приведено на рис. 1.

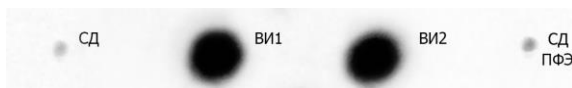


Рис. 1. Изображение падающих на экран возбуждающих импульсов и сигналов СД и ПФЭ при временном интервале между возбуждающими импульсами  $\tau_{12} = 0 - \tau_u$

Возбужденные в кристаллах экситонные состояния за счет фононного взаимодействия мгновенно локализовывались на квантовых уровнях, характерных для дефектов кристаллической решетки в виде межузельных атомов цинка ( $Zn_i^x$ ) и вакансий кислорода ( $V_o^x$ ). Из-за проявления квантово-размерного эффекта при локализации экситонов на наноразмерных кластерах дефектов, в спектре таких состояний возможно проявление тонкой структуры [12], на котором возбужденный экситон может долгое время хранить фазу пришедшего возбуждающего импульса. Дальнейшая релаксация возбужденного экситона происходила через глубокие уровни, образованные дефектами: вакансиями атомов цинка ( $V_{zn}^0$ ) и межузельными атомами кислорода ( $O_{i,o}^{-1}$ ); в результате чего возможно было регистрировать сигналы ФЭ на длине волны 780-820 нм. При этом формируемые в этой полупроводниковой пленке сигналы СД и ПФЭ, согласно существующим для них условиям пространственного синхронизма, наблюдались в одном и том же направлении. Средняя мощность сигнала СД уменьшалась до нуля как при опережении второго возбуждающего импульса относительно первого, так и при его отставании.

При опережении первого импульса относительно второго, то есть по мере уменьшения перекрытия вторым возбуждающим лазерным импульсом первого импульса, наблюдалось уменьшение средней мощности сигнала СД в направле-

нии  $\bar{k}_{ПФЭ1}$ . Одновременно, происходит увеличение средней мощности сигнала ПФЭ в силу увеличения количества суперпозиционных состояний возбужденных частиц, участвующих в процессе формирования фазовой памяти среды. Средняя мощность сигнала ПФЭ нарастает до тех пор, пока вклад диссипативных процессов затухания возбужденного состояния не уравнивает вклад нарастания средней мощности эхо-сигнала из-за увеличения числа возбужденных частиц (см. рис. 2). Достигнув максимального значения, средняя мощность сигнала ПФЭ уменьшалась при дальнейшем увеличении временного интервала между возбуждающими импульсами (рис. 2), это связано с увеличением вероятности взаимодействия между собой соседних суперпозиционных состояний экситонов. На участке доминирования диссипативных процессов и отсутствия вклада средней мощности самодифракции (СД равно нулю) в мощность регистрируемого сигнала происходит регистрация значений эхо-сигнала, которые используются для вычисления времени необратимой поперечной релаксации  $T_2$ . При большой концентрации суперпозиционных локализованных экситонных состояний имеет место резкое возрастание средней мощности эхо-сигнала, пропорциональной их количеству –  $N^2$ , квадрату числа возбуждаемых частиц. В этом случае может иметь место ситуация, когда наблюдается интенсивное увеличение количества возбуждаемых частиц, т.е. спадающий по мощности сигнал СД перекрывает максимальное значение эхо-сигнала. Потому для достоверного измерения времени релаксации  $T_2$  регистрировались значения средней мощности эхо-сигнала на кривой его спада в моменты, когда средняя мощность сигнала СД достигала нулевого значения.

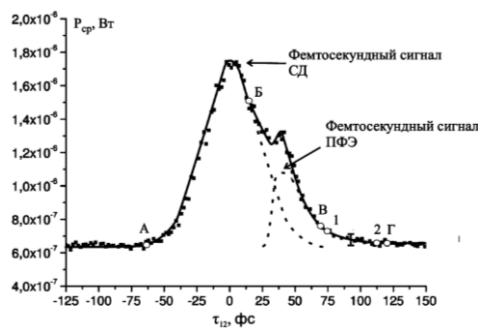


Рис. 2. Факт регистрации сигнала ПФЭ, возбуждаемого в пленке ZnO/Si(P)/Si(B), в зависимости от временного интервала  $\tau_{12}$  между первым и вторым возбуждающими импульсами. Здесь участок АБ-регистрация сигнала СД; участок БВ-регистрация сигналов СД+ПФЭ; участок ВГ-регистрация сигнала ПФЭ

По двум значениям средней мощности ПФЭ, взятым в точках 1 и 2, в моменты, когда мощность сигнала СД достигает нулевого значения, определялась разность временных интервалов  $\tau_{12}$ , отделяющих возбуждающие лазерные импульсы в точках 1 и 2 ( $\tau_{12}^{(1)}$  и  $\tau_{12}^{(2)}$ ) для соответствующих значений мощности сигнала ПФЭ. Подставляя полученные значения временных интервалов  $\tau_{12}^{(1)}$  и  $\tau_{12}^{(2)}$ , и средние интенсивности сигналов ПФЭ  $I_{ср.л}^{(1)}$  и  $I_{ср.л}^{(2)}$  (рассчитанных как отношение регистрируемой средней мощности сигналов к возбуждаемой площадке  $S=0,001225$  см<sup>2</sup>) в выражение (1) определялось значение времени необратимой поперечной релаксации  $T_2$ :

$$T_2 = \frac{4(\tau_{12}^{(2)} - \tau_{12}^{(1)})}{\ln\left(\frac{I_{cp,n}^{(1)}}{I_{cp,n}^{(2)}}\right)}, \quad (1)$$

При этом в первом эксперименте значение времени релаксации  $T_2$  для трехслойной полупроводниковой пленки ZnO/Si(P)/Si(B), состоящей из трех пленок толщиной по 100 нм, составило  $1900 \pm 320$  фс. Далее, отладив методику регистрации ПФЭ на примере трехслойной пленки, были проведены эксперименты по обнаружению ПФЭ, формировавшегося в режиме двухфотонного возбуждения, в однослойной пленке ZnO толщиной 800 нм. Измеренное в ней время релаксации  $T_2$  составило  $130 \pm 30$  фс (см. рис. 3).

Также в этой главе сообщается о первом эксперименте по обнаружению в тонкой текстурированной пленке оксида цинка сигнала СФЭ, формирующегося в режиме двухфотонного возбуждения (рис. 4). Показана возможность регистрации с помощью этого эхо-сигнала времени необратимой продольной релаксации  $T_1$ , для пленки ZnO толщиной 100 нм, составившего  $4300 \pm 690$  фс. При этом были выполнены все условия возбуждения СФЭ, аналогичные условиям для ПФЭ: в качестве резонансной среды, имеющей резонансный переход на длине 400 нм и время затухания люминесценции, превышающее значение  $T_2$ , выбрана тонкая текстурированная пленка оксида цинка (ZnO) толщиной 100 нм, обеспечено условие пространственного синхронизма, характерное для СФЭ, импульсная площадь возбуждающих импульсов составляла порядка  $\pi/2$ , обеспечена возможность изменения временного интервала между вторым и третьим возбуждающими лазерными импульсами в интервале значений, превышающем длительность возбуждающего импульса и время релаксации  $T_2$ .

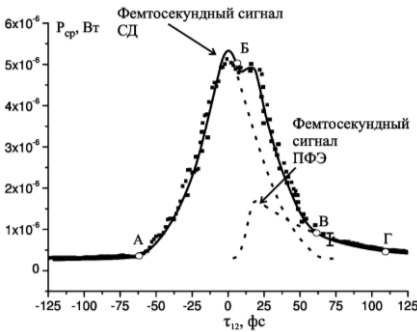


Рис. 3. Зависимость средней мощности сигналов СД и ПФЭ в пленке ZnO толщиной 800 нм от временного интервала  $\tau_{12}$  между возбуждающими лазерными импульсами. Здесь участок АБ-регистрация сигнала СД; участок БВ-регистрация сигналов СД+ПФЭ; участок ВГ-регистрация сигнала ПФЭ

Квантовые уровни энергии, обусловленные дефектным состоянием кристаллической решетки ZnO, лежат вблизи края зоны проводимости. Потому их резонансное возбуждение лазерным излучением с центральной длиной волны 800 нм возможно только в режиме двухфотонного возбуждения. При этом, наноразмерные кластеры, включающие дефекты кристаллической структуры, пространственно- и энергетически ограничены неповрежденной кристаллической решеткой, обладают свойствами квантовых точек. Энергия лазерного ультракороткого (меньше характерных времен релаксации возбужденного состояния) лазерного импуль-

са за счет своей спектральной ширины возбуждает уровни свободных экситонов так и уровни локализованных экситонных состояний на дефектах кристаллической решетки, входящие в возбуждаемые наноразмерные кластеры. В этом случае двухфотонное возбуждение сигналов фемтосекундного ФЭ не включает механизм рассеяния энергии возбуждающего излучения за счет фононного взаимодействия.

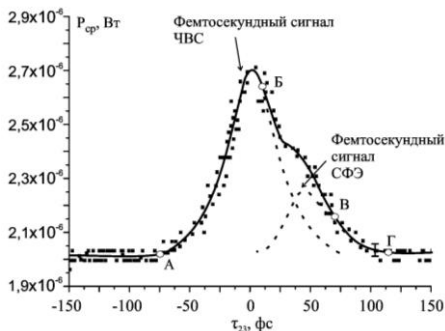


Рис. 4. Зависимость средней мощности сигналов ЧВС и СФЭ при увеличении временного интервала  $\tau_{23}$  между возбуждающими импульсами при постоянном значении временного интервала  $\tau_{12}$  для пленки оксида цинка толщиной 100 нм. Здесь: участок АВ-регистрация сигнала ЧВС; участок БВ-регистрация сигналов ЧВС+СФЭ; участок ВГ-регистрация сигнала СФЭ

Ввиду широкой запрещённой зоны экситонные переходы возбуждались в режиме двухфотонного поглощения. Регистрация сигнала ФЭ происходила в направлении  $\vec{k}_{\text{СФЭ1}} = -\vec{k}_1 + \vec{k}_2 + \vec{k}_3$ ,  $\vec{k}_{\text{СФЭ2}} = -\vec{k}_2 + \vec{k}_1 + \vec{k}_3$ ,  $\vec{k}_{\text{СФЭ3}} = -\vec{k}_2 + \vec{k}_3 + \vec{k}_1$ . Изображение падающих на экран, установленного позади резонансной среды, когерентных сигналов в направлении вытекающих из условий пространственного синхронизма для СФЭ, приведено на рис. 5.

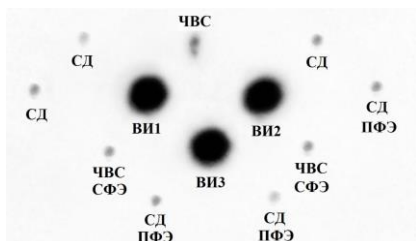


Рис. 5. Изображение падающих на экран возбуждающих импульсов и сигналов СД, ПФЭ, ЧВС и СФЭ при временном интервале между возбуждающими импульсами  $\tau_{12} = 0 - \tau_u$  и  $\tau_{23} = 0 - \tau_u$

Методика измерения времени релаксации  $T_1$  заключалась в обеспечении условий возбуждения сигнала СФЭ и выборе двух контрольных точек на кривой спада средней мощности СФЭ, обусловленного протекающим в резонансной среде диссипативным процессам, вызванным уменьшением числа возбужденных частиц из-за их энергетического взаимодействия. Особенность регистрации СФЭ заключается в том, что условия его пространственного синхронизма совпадают с условиями для сигнала четырехволнового смешения, имеющего максимальное значение при нулевых временных интервалах между всеми 3 оптическими импульсами и уменьшающегося в нашем случае по мере увеличения временного интервала между 2 и 3 возбуждающими импульсами. Чтобы исключить влияние ЧВС на результаты измерений времени  $T_1$ , контрольные точки на кривой спада средней мощности СФЭ в зависимости от увеличения временного интервала,

отделяющего 2 и 3 возбуждающие лазерные импульсы, выбираются в те моменты, когда средняя мощность сигнала ЧВС достигает нулевого значения.

Аналогично условиям регистрации ПФЭ регистрация СФЭ проводилась на длине волны, близкой к 800 нм. Так как у пленки ZnO не было разрешенного перехода на частоте поглощения возбуждающего лазерного излучения с центральной длиной волны 800 нм, то для возбуждения использовался двухфотонный режим возбуждения, обеспечивавший перекрытие всей неоднородной ширины спектральной линии экситонных состояний ZnO, резонансных к лазерному излучению на длине волны 400 нм. Возбужденные в кристаллах экситоны за счет фоновонного взаимодействия локализовались на квантовых уровнях, характерных для дефектов кристаллической решетки. Дальнейшая рекомбинация этого состояния протекала через распад и локализацию на глубоком уровне запрещенной зоны. На этом уровне, находящихся в запрещенной зоне формировался и излучался сигнал СФЭ на длине волны 780-820 нм. При этом формируемые в этой полупроводниковой пленке сигналы ЧВС и СФЭ, согласно существующим для них условиям пространственного синхронизма, наблюдались в одном и том же направлении.

По значениям интенсивности СФЭ  $I_{ср.с}^{(1)}$  и  $I_{ср.с}^{(2)}$  (рассчитанных как отношение регистрируемой средней мощности сигналов к возбуждаемой площадке  $S=0,001225 \text{ см}^2$ ), взятым для величин  $\tau_{23}$ , в контрольных точках 1 и 2 (когда средняя мощность сигнала ЧВС равна нулю) из выражения (2) получаются значения времени необратимой продольной релаксации  $T_1$

$$T_1 = \frac{2(\tau_{23}^{(2)} - \tau_{23}^{(1)})}{\ln\left(\frac{I_{ср.с}^{(1)}}{I_{ср.с}^{(2)}}\right)}. \quad (2)$$

Время необратимой продольной релаксации  $T_1$ , с использованием формулы (2) для пленки ZnO толщиной 100 нм составило  $4300 \pm 690$  фс.

В четвертой главе сообщаются результаты экспериментов по наблюдению увеличения времени релаксации  $T_2$  при уменьшении толщины пленки, содержащей кластеры. Установлен зарегистрированный эффект увеличения времени необратимой поперечной релаксации  $T_2$  возбужденного суперпозиционного экситонного состояния тонких пленок типа ZnO по мере уменьшения толщины пленки в диапазоне значений меньших длины волны возбуждающего излучения. Для двух пленок оксида цинка толщиной 600 и 800 нм зарегистрированы времена необратимой поперечной релаксации  $T_2$ , составившее для пленки 600 нм –  $320 \pm 60$  фс, для пленки 800 нм –  $130 \pm 30$  фс (рис. 6).

Наблюдаемый эффект увеличения времени необратимой поперечной релаксации  $T_2$  с уменьшением толщины полупроводниковых пленок связан с уменьшением плотности квантово-размерных объектов в виде экситонов, локализованных на дефектах этой пленки. То есть одно и то же количество экситонов, определяемое мощностью лазерного излучения, возбуждается и затем локализуется на большем количестве дефектов. В этом случае увеличившееся количество дефектов приводит к возникновению большего количества наноразмерных кластеров. Таким образом, на каждом таком наноразмерном кластере локализуется меньшее количество экситонов. По мере уменьшения концентрации экситонов определя-

ющий механизм релаксации переходит от упругого и неупругого экситон-экситонного рассеяния к экситон-фононному взаимодействию. Тем самым ПФЭ впервые применено для исследования ранее зарегистрированного факта увеличения концентрации точечных дефектов и дислокаций по мере уменьшения толщины пленки, продемонстрированного ранее на примере пленок  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  на сапфире, изготовленных методом магнетронного распыления: от  $0,11 \cdot 10^{-19} \text{ см}^2$  у пленки толщиной  $0,8235 \text{ мкм}$  до  $2 \cdot 10^{-19} \text{ см}^2$  у пленки толщиной  $0,093 \text{ мкм}$  [15].

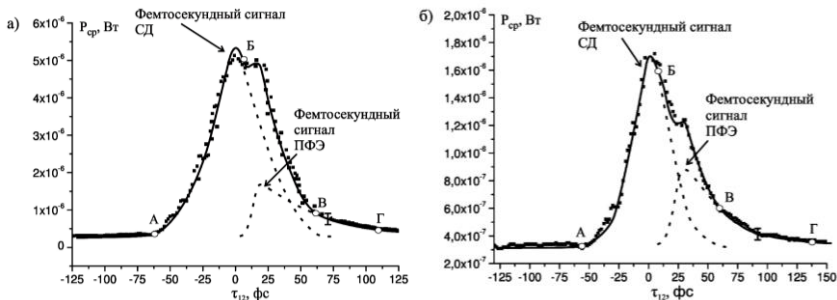


Рис. 6. Зависимость средней мощности сигналов СД и ПФЭ в пленке ZnO толщиной 800 нм (а) и 600 нм (б) от временного интервала между возбуждающими лазерными импульсами: участок АБ-регистрация сигнала СД; участок БВ-регистрация сигналов СД+ПФЭ; участок ВГ-регистрация сигнала ПФЭ

Также в этой главе сообщается о первом эксперименте по обнаружению СФЭ в тонкой текстурированной пленке кремния, легированного бором или фосфором, при формировании эхо-сигнала в режиме однофотонного возбуждения (рис. 7). Отличие формирования СФЭ в однофотонном режиме возбуждения от режима двухфотонного возбуждения заключается в том, что эхо-сигнал возбуждался на квантовых уровнях частиц резонансной среды, находящихся как в узлах кристаллической решетки, так и в атомах, лежащих в запрещенной зоне. При этом уровни энергии атомов в узлах кристаллической решетки и атомов, находящихся в дефектах кристаллической решетки, перекрываются энергией лазерного излучения с длиной волны 800 нм. В этом случае, наноразмерные кластеры включают частицы с дефектами кристаллической структуры пространственно- и энергетически ограниченные частицами, расположенными в узлах не поврежденной кристаллической решетки, и обладают свойствами квантовых точек. Энергия лазерного ультракороткого (меньшего характерных времен релаксации возбужденного состояния) лазерного импульса за счет своей спектральной ширины возбуждает частицы, как не имеющие дефекты кристаллической решетки, так и частицы с дефектами кристаллической решетки, входящие в возбуждаемые наноразмерные кластеры. При этом однофотонное возбуждение сигналов фемтосекундного ФЭ не включает механизм рассеяния энергии возбуждающего излучения за счет фононного взаимодействия. Регистрация сигнала ФЭ происходила в направлениях  $\vec{k}_{\text{СФЭ}1} = -\vec{k}_1 + \vec{k}_2 + \vec{k}_3$ ,  $\vec{k}_{\text{СФЭ}2} = -\vec{k}_2 + \vec{k}_1 + \vec{k}_3$ ,  $\vec{k}_{\text{СФЭ}3} = -\vec{k}_2 + \vec{k}_3 + \vec{k}_1$ .

Показана возможность регистрации в этих пленках с помощью СФЭ времени необратимой продольной релаксации  $T_1$ , для пленки Si(P) и Si(B) толщиной 100

нм, составившего  $670 \pm 120$  и  $280 \pm 50$  фс. При этом были выполнены все условия возбуждения СФЭ: обеспечивался резонанс лазерного излучения с длиной волны 800 нм на соответствующем квантовом переходе; выполнялось условие пространственного синхронизма, характерное для СФЭ; импульсная площадь возбуждающих импульсов составляла порядка  $\pi/2$ ; имелась возможность изменения временного интервала между вторым и третьим возбуждающими лазерными импульсами в интервале значений, превышающем длительность возбуждающего импульса и время релаксации  $T_2$ .

Методика измерения времени релаксации  $T_1$  аналогично формированию СФЭ в двухфотонном возбуждении заключалась в обеспечении условий возбуждения сигнала СФЭ и выборе двух контрольных точек на кривой спада средней мощности СФЭ, обязанного протекающим в резонансной среде диссипативным процессам. На этом участке происходит уменьшение средней мощности сигнала СФЭ из-за уменьшения числа возбужденных частиц. В этом случае, также условия пространственного синхронизма СФЭ совпадают с условиями для сигнала ЧВС. Сигнал ЧВС имеет максимальное значение при нулевых временных интервалах между всеми 3 оптическими импульсами. Он уменьшается, в нашем случае, по мере увеличения временного интервала между 2 и 3 возбуждающими импульсами. Чтобы исключить влияние ЧВС на результаты измерений времени  $T_1$ , контрольные точки на кривой спада средней мощности СФЭ в зависимости от увеличения временного интервала, отделяющего 2 и 3 возбуждающие лазерные импульсы, также выбираются в те моменты, когда интенсивность сигнала ЧВС достигает нулевого значения.

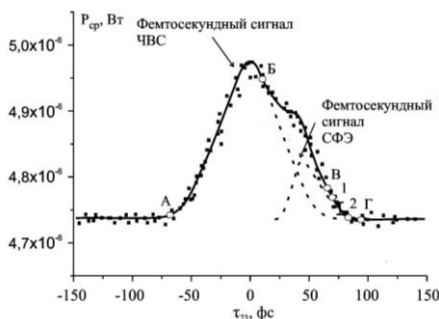


Рис. 7. Зависимости средней мощности сигналов ЧВС и СФЭ при увеличении временного интервала  $\tau_{23}$  между возбуждающими импульсами при постоянном значении временного интервала  $\tau_{12}$  для пленки кремния, легированного бором толщиной 100 нм. Здесь: участок АВ-регистрация сигнала ЧВС; участок БВ-регистрация сигналов ЧВС+СФЭ; участок ВГ-регистрация сигнала СФЭ

Формируемые в этих полупроводниковых пленках сигналы ЧВС и СФЭ, согласно существующим для них условиям пространственного синхронизма, наблюдались в одном и том же направлении.

По значениям средней мощности сигналов СФЭ, взятым для величин  $\tau_{23}$ , в контрольных точках 1 и 2 (когда средняя мощность сигнала ЧВС равна нулю) из выражения (2) получаются значения времени необратимой продольной релаксации  $T_1$ .

В данной главе показан эффект увеличения времени необратимой продольной релаксации  $T_1$  трехслойной пленки ZnO/Si(P)/Si(B) по сравнению со значениями этой величины для отдельных пленок толщиной по 100 нм, входящих в трех-



слоистую пленку. На рис. 8 показаны зависимости средней мощности сигналов ЧВС и СФЭ от времени  $\tau_{23}$  при остающемся неизменным интервалом  $\tau_{12}=0$ , регистрирующихся в направлении СФЭ для ряда пленок: трехслойная пленка ZnO/Si(P)/Si(B), пленка ZnO, пленка Si(P), пленка Si(B). Данные зависимости позволили получить время необратимой продольной релаксации  $T_1$  для этих пленок. Из рис. 8 следует, что из-за диффузии носителей на границе полупроводникового перехода, образованного различными полупроводниковыми пленками, происходит значительное увеличение времени необратимой продольной релаксации  $T_1$ . Для отдельных пленок толщиной 100 нм оно составило: для ZnO –  $4300 \pm 690$  фс; для Si(P) –  $670 \pm 120$  фс; для Si(B) –  $280 \pm 50$  фс. Наибольшее время затухания решетки населенностей, формирующейся на экситонах, наблюдается в трехслойной пленке ZnO/Si(P)/Si(B). Это подтверждается временем необратимой продольной релаксации  $T_1$ , составившим  $13000 \pm 1900$  фс. Такое увеличение времени релаксации  $T_1$ , в большей степени, обязано встречной диффузии зарядов на полупроводниковом p-n переходе. Под действием внутреннего поля гетероперехода большая часть возбуждаемых экситонов претерпевает действие, приводящее к разрыву кулоновского притяжения электрона и дырки. Что снижает количество локализованных экситонов и приводит к большему времени затухания из-за уменьшения интенсивности их столкновений.

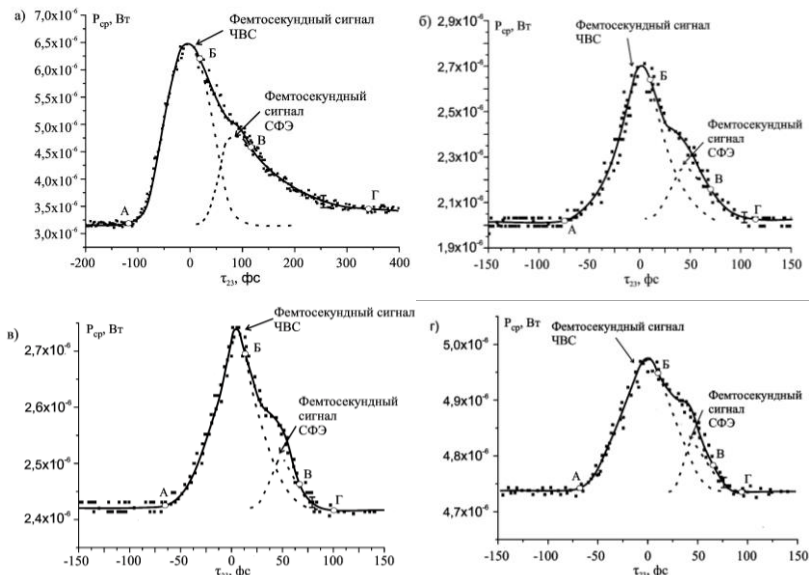


Рис. 8. Зависимости средней мощности сигналов ЧВС и СФЭ от времени между возбуждающими импульсами  $\tau_{23}$  для различных полупроводниковых пленок: а) 3-хслойная пленка ZnO/Si(P)/Si(B); б) пленка ZnO; в) пленка Si(P); г) пленка Si(B). Здесь: участок АБ-регистрация сигнала ЧВС; участок БВ-регистрация сигналов ЧВС+СФЭ; участок ВГ-регистрация сигнала СФЭ

При количественной оценке релаксационных процессов в исследуемых пленках следует принимать во внимание, что приведенные значения времен релаксации  $T_1$  и  $T_2$  соответствуют только примененной интерпретации экспериментальных данных, не учитывающей роль фононов, и эти значения требуют уточнений по мере развития теории ФЭ для этих сред и получения дополнительных экспериментальных данных роли фононов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключении сформулированы основные результаты работы.

Поставленная цель работы по экспериментальному обнаружению фотонного эха при комнатной температуре и исследованию его свойств, на локализованных экситонных состояниях в текстурированных тонких пленках, полученных методом магнетронного распыления, полностью достигнута, а задачи решены.

С помощью обнаруженных сигналов ПФЭ, возбуждаемых в двухфотонном режиме поглощения резонансного лазерного излучения, и СФЭ, возбуждаемых как в однофотонном, так и двухфотонном режимах поглощения, получены значения характерных времен релаксации  $T_1$  и  $T_2$  для фиксированных значений температуры, плотности дефектов и мощности лазерных импульсов для пленок оксида цинка толщиной 100, 600 и 800 нм, кремния, легированного бором, кремния легированного фосфором с толщиной 100 нм и трехслойной пленки  $\text{ZnO/Si(P)/Si(B)}$  с толщиной каждого слоя по 100 нм.

По результатам измерения времен релаксации сделаны следующие выводы:

- с уменьшением толщины тонкой текстурированной пленки, увеличивается количество дефектов кристаллической решетки, что при постоянных параметрах лазерного излучения, возбуждающего постоянное количество экситонов, приводит к уменьшению плотности экситонов, локализующихся на каждом дефекте. Это, в свою очередь, обеспечивает снижение столкновений частиц экситонного газа и к увеличению времени релаксации  $T_2$ .

- на тонкопленочном полупроводниковом переходе из-за диффузии на нем носителей заряда происходит разрыв кулоновских связей между электроном и дыркой в некоторых экситонах, что приводит к уменьшению плотности экситонов на каждом дефекте и увеличению времени релаксации  $T_1$  для тонкой текстурированной пленки, находящейся в составе полупроводникового перехода по сравнению со значением этого времени для этой же пленки такой же толщины

С помощью фотонного эха возможно получение спектроскопической информации, характеризующей динамические процессы, протекающие на экситонных состояниях в наноразмерных кластерах при комнатной температуре. На основе этой информации возможно исследование таких квантово-размерных объектов как в однослойных пленках, так и на тонкопленочном полупроводниковом переходе. При этом будет возможно оценивать параметры этих кластеров и характер текстурирования тонких пленок. Измерение характерных времен релаксации экситонных состояний даст представление о временном диапазоне, в течении которого возможно функционирование нового класса полупроводниковых приборов, создаваемых на новых физических эффектах, типа нефарадеевского поворота вектора поляризации фотонного эха.

### Список цитируемой литературы:

1. D'Amico, I. The excitonic quantum computer / I. D'Amico, S. De Rinaldis, E. Biolatti [et al.] // *Physica Status Solidi (B)*. – 2002 – Vol. 234, Iss. 1. – P. 58–69.
2. Schneck, J. R. Temperature dependent photon echoes of a GaN thin film / J. R. Schneck, E. Dimakis, J. Woodward [et al.] // *Appl. Phys. Lett.* – 2012. – Vol. 101. – P. 142102.
3. Wagner, H.P. Dephasing of excitons in ZnSe and ZnSe/ZnS<sub>x</sub>Se<sub>1-x</sub> quantum wells / H.P. Wagner, J. Lehmann, B. Hahn // *Journal of Luminescence*. – 1995. – Vol. 66-67. – P. 84-88.
4. Fischer, A.J. Femtosecond Coherent Spectroscopy of Bulk ZnSe and ZnCdSe/ZnSe Quantum Wells / A.J. Fischer, D.S. Kim, J. Hays [et al.] // *Phys. Rev. Lett.* – 1994. – Vol. 73. – P. 2368.
5. Petta, J.R. Coherent Manipulation of Coupled Electron Spins in Semiconductor Quantum Dots / Petta, J. R.; Johnson, A. C.; Taylor, J. M. [et al.] // *Science*. – 2005. – Vol. 309. – P. 2180-2184.
6. Coe, S. Electroluminescence from Single Monolayers of Nanocrystals in Molecular Organic Devices / S. Coe, W. Woo, M. Bawendi [et al.] // *Nature*. – 2002. – Vol. 420. – P. 800-803.
7. Schaller, R. D. High Efficiency Carrier Multiplication in PbSe Nanocrystals: Implications for Solar Energy Conversion / R. D. Schaller, V.I. Klimov // *Phys. Rev. Lett.* – 2004. – Vol. 92. – P. 186601.
8. Hazu, K. Optical nonlinearities and phase relaxation of excitons in GaN / K. Hazu, A. Shikanai, T. Sota [et al.] // *Phys. Rev. B*. – 2002. – Vol. 65. – P. 195202.
9. Pau, S. Femtosecond degenerate four-wave mixing of GaN on sapphire: Measurement of intrinsic exciton dephasing time / S. Pau, J. Kuhl, F. Scholz [et al.] // *Phys. Rev. B*. – 1997. – Vol. 56. – P. R12718(R).
10. Webb, M.D. Stimulated-picosecond-photon-echo studies of localized exciton relaxation and dephasing in GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As multiple quantum wells / M. D. Webb, S. T. Cundiff, D. G. Steel // *Phys. Rev. B*. – Vol. 43. – P. 12658.
11. Moody, G. Intrinsic homogeneous linewidth and broadening mechanisms of excitons in monolayer transition metal dichalcogenides / G. Moody, C. Kavir Dass, K. Hao // *Nature Communications*. – 2015. – Vol. 6. – P. 8315.
12. Ho, C.-H. Thermoreflectance characterization of  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thin-film nanostrips / C.-H. Ho, C.-Y. Tseng, L.-C. Tien // *Optics Express*. – 2010. – Vol. 18, № 16. – P. 16360-16369.
13. Мирзаде, Ф.Х. Кинетика нуклеации кластеров и формирование наноструктур в конденсированных системах Современные лазерно-информационные и лазерные технологии / под ред. В.Я. Панченко, В.С. Голубева. – М.: Интерконтакт Наука, 2005. – С. 62-78.
14. Попов, И.И. Нефарадеевский поворот вектора поляризации стимулированного фотонного эха в тонкой поликристаллической пленке ZnO/Si(P)/Si(B) / И.И. Попов, Н.С. Вашурин, С.Э. Путилин // *Учен. зап. физ. фак-та Моск. ун-та*. – 2015. – № 4. – С. 154338.
15. Гольман, Е.К. Получение толстых пленок YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7- $\delta$</sub>  на сапфире с подслоем оксида церия / Е.К. Гольман, Д.А. Плуткин, С.В. Разумов [и др.] // *Журнал технической физики*. – 1999. – Том 69, вып. 9. – С. 132-136.

**Основное содержание диссертации отражено в следующих работах:**

*Статьи в журналах из перечня ВАК РФ:*

A1. Vashurin, N.S. Photon echoes in molecular iodine vapors and nanofilms as a method of optical data processing / I. I. Popov, N. S. Vashurin, K. Sh. Gazizov [et al.] // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2012. – Vol. 76, No. 3. – P. 279-282.

A2. Vashurin, N.S. Signals of the femtosecond photon echo in inorganic films and their recording / I.I. Popov, N.S. Vashurin, S.E. Putilin [et al.] // Physics of Wave Phenomena. – 2013. – Vol. 21, № 1. – P. 38-40.

A3. Вaшурин, Н.С. Двухфотонное возбуждение и особенности регистрации фемтосекундного фотонного эха в пленках оксида цинка наноразмерной толщины / Н.С. Вaшурин, И.И. Попов, В.Т. Сидорова [и др.] // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер: Физ.-матем. науки. – 2013. – Т. 155, кн. 1. – С. 29-35.

A4. Вaшурин, Н.С. Фемтосекундное фотонное эхо на неоднородных по размеру квантовых точках оксида цинка при комнатной температуре / Н.С. Вaшурин, И.И. Попов, С.Э. Путилин [и др.] // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2013. – №1 (83). – С. 65-69.

A5. Вaшурин, Н.С. Фотонное эхо и зондовая микроскопия как методы исследования тонких пленок для микроэлектронных датчиков / А.В. Мороз, Н.С. Вaшурин, И.И. Попов [и др.] // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2012. – № 2 (16). – С. 64-72.

A6. Вaшурин, Н.С. Фотонное эхо как метод исследования взаимодействия мощных фемтосекундных импульсов с полупроводниковыми пленками наноразмерной толщины / И.И. Попов, Н.С. Вaшурин, С.А. Степанов, Н.И. Сушенцов // Известия РАН, Серия физическая. – 2014. – Т. 78, № 3. – С. 309–312.

A7. Vashurin, N.S. Photon echoes in single and trilayer semiconductor films of different nanosized thicknesses and their properties / I.I. Popov, N.S. Vashurin, S.E. Putilin [et al.] // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2014. – Vol. 78, №. 2. – P. 152–155.

A8. Вaшурин, Н.С. Технологические методы формирования тонких пленок / Н.И. Сушенцов, Н.С. Вaшурин, С.А. Степанов [и др.] // Известия РАН, Серия физическая. – 2014. – Т. 78, № 3. – С. 313–315.

A9. Вaшурин, Н.С. Новые подходы получения материалов наноэлектроники магнетронным распылением с использованием методов контроля их структуры и оптических свойств / И.И. Попов, Н.С. Вaшурин, А.В. Мороз [и др.] // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2014. – № 3 (22). – С. 74-96.

A10. Vashurin, N.S. Fabrication and study of thin functional films for optoelectronics and lighting / I.I. Popov, N.S. Vashurin, S.E. Putilin [et al.] // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2014. – Vol. 78, № 12. – P. 1295–1298.

A11. Vashurin, N.S. Investigation of relaxation in quantum dot ensembles in thin semiconductor films by photon-echo technique / I.I. Popov, N.S. Vashurin, S.E. Putilin [et al.] // Physics of Wave Phenomena. – 2015. – Vol. 23, №. 2. – P. 101-104.

A12. Вaшурин, Н.С. Физические основы экситонного приборостроения на основе фотонного эха / И.И. Попов, Н.С. Вaшурин, А.У. Баходуров // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радио-

технические и инфокоммуникационные системы. – 2016. – № 1 (29). – С. 64-75.

*Статьи в рецензируемых сборниках конференций:*

A13. Вашурин, Н.С. Техника фемтосекундного эксперимента по фотонному эхо и перспективы ее применения / Н.С. Вашурин, И.И. Попов, С.А. Козлов [и др.] // Материалы Пятой международной научной школы «Наука и инновации – 2010» / Под ред. И.И. Попова и др. – Йошкар-Ола: МарГУ, 2010. – С. 50-55.

A14. Вашурин, Н.С. Обнаружение и исследование сигналов первичного и обращенного стимулированного фотонного эха в неорганических нанопленках / Н.С. Вашурин, И.И. Попов, С.Э. Путилин [и др.] // Материалы Шестой международной научной школы «Наука и инновации – 2011» / под ред. И.И. Попова и др. – Йошкар-Ола: МарГУ, – 2011. – С. 58-62.

A15. Вашурин, Н.С. Метод контроля неоднородности структуры и толщины неорганической нанопленки ZnO в технике фотонного эха / Н.С. Вашурин, И.И. Попов, С.Э. Путилин [и др.] // Материалы Шестой международной научной школы «Наука и инновации – 2011» / под ред. И.И. Попова и др. – Йошкар-Ола: МарГУ, 2011. – С. 66-67.

A16. Вашурин, Н.С. Обнаружение и исследование сигналов первичного и стимулированного фотонного эха в неорганических нанопленках / Н.С. Вашурин, И.И. Попов, С.Э. Путилин [и др.] // Когерентная оптика и оптическая спектроскопия: XV Всероссийская молодежная научная школа: сборник статей / под ред. М.Х. Салахова. – Казань: Казан. ун-т, 2011. – Вып. XV. – С. 40-46.

A17. Вашурин, Н.С. Особенности возбуждения и регистрации сигналов первичного и стимулированного фотонного эха в нанопленках фоточувствительных солнечных батарей / Н.С. Вашурин, И.И. Попов // Студенческая наука и XXI век: материалы научно-практической конференции студентов по итогам научно-исследовательской работы за 2011 год. – Йошкар-Ола: Мар. гос. ун-т, 2012. – Вып. 9. – С. 121-127.

A18. Вашурин, Н.С. Двухфотонное возбуждение и особенности регистрации фемтосекундного фотонного эха в пленках оксида цинка наноразмерной толщины / Н.С. Вашурин, И.И. Попов, В.Т. Сидорова [и др.] // Когерентная и оптическая спектроскопия: XVI Всероссийская молодежная научная школа: сборник статей / под ред. М.Х. Салахова. – Казань: Казан. ун-т, 2012. – С. 189-191.

A19. Вашурин, Н.С. Особенности регистрации фотонного эха в нанопленках ZnO в условиях рассеянной части энергии эхо-сигнала на оптических фонах / В.Т. Сидорова, Н.С. Вашурин, И.И. Попов [и др.] // Когерентная и оптическая спектроскопия: XVI Всероссийская молодежная научная школа: сборник статей / под ред. М.Х. Салахова. – Казань: Казан. ун-т, 2012. – С. 104-107.

A20. Вашурин, Н.С. Поликристаллические структуры тонких пленок ZnO и фотонное эхо как метод контроля их толщины / С.А. Степанов, В.Т. Сидорова, Н.С. Вашурин [и др.] // Когерентная и оптическая спектроскопия: XVI Всероссийская молодежная научная школа: сборник статей / под ред. М.Х. Салахова. – Казань: Казан. ун-т, 2012. – С. 108-111.

A21. Вашурин, Н.С. Двухфотонное возбуждение на свободных экситонах и особенности регистрации фемтосекундного фотонного эха в пленках оксида цинка наноразмерной толщины / Н.С. Вашурин, И.И. Попов, В.Т. Сидорова [и др.] //

Материалы Седьмой международной научной школы «Наука и инновации – 2012» / под ред. И.И. Попова и др. – Йошкар-Ола: МарГУ, 2012. – С. 31-36.

A22. Вaшуpин, Н.С. Особенности регистрации фотонного эха при его частичном рассеянии на оптических фонах в нанопленках ZnO / В.Т. Сидорова, Н.С. Вaшуpин, И.И. Попов [и др.] // Материалы Седьмой международной научной школы «Наука и инновации – 2012» / под ред. И.И. Попова и др. – Йошкар-Ола: МарГУ, 2012. – С. 87-90.

A23. Вaшуpин, Н.С. Фотонное эхо как метод исследования поликристаллических структур тонких пленок ZnO / С.А. Степанов, В.Т. Сидорова, Н.С. Вaшуpин [и др.] // Материалы Седьмой международной научной школы «Наука и инновации – 2012» / под ред. И.И. Попова и др. – Йошкар-Ола: МарГУ, 2012. – С. 90-93.

A24. Вaшуpин, Н.С. Фотонное эхо как метод исследования взаимодействия мощных фемтосекундных импульсов с полупроводниковыми пленками наноразмерной толщины / И.И. Попов, Н.С. Вaшуpин, М.А. Исаев, В.Т. Сидорова // Материалы X международного симпозиума по фотонному эхо и когерентной спектроскопии (ФЭКС'2013). – Йошкар-Ола: ФГБОУ ВПО «Поволжский государственный технологический университет», 2013. – С. 107-110.

A25. Вaшуpин, Н.С. Технология получения и контроль методом фотонного эха тонких плёнок оксида цинка / С.А. Степанов, И.И. Попов, Н.С. Вaшуpин [и др.] // Материалы X международного симпозиума по фотонному эхо и когерентной спектроскопии (ФЭКС'2013) – Йошкар-Ола: ФГБОУ ВПО «Поволжский государственный технологический университет», 2013. – С. 176-180.

A26. Вaшуpин, Н.С. Фемтосекундное фотонное эхо как метод исследования влияния дефектов кристаллической структуры полупроводников на релаксационные процессы / Н.С. Вaшуpин, И.И. Попов, С.А. Степанов, Н.И. Сушенцов // Материалы Девятой международной научной школы «Наука и инновации-2014» ISS «SI-2014» / под ред. И. И. Попова, В. А. Козлова, В. В. Самарцева. – Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2014. – С. 63-65.

A27. Вaшуpин, Н.С. Поляризационные свойства стимулированного фотонного эха в полупроводниковой тонкой пленке при воздействии продольного однородного магнитного поля / Н. С. Вaшуpин, И. И. Попов, С. Э. Путилин [и др.] // Материалы Девятой международной научной школы «Наука и инновации-2014» ISS «SI-2014» / под ред. И. И. Попова, В. А. Козлова, В. В. Самарцева. – Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2014. – С. 90-93.

A28. Вaшуpин, Н.С. Спектроскопические исследования тонких поликристаллических пленок методом фемтосекундного фотонного эха / Н.С. Вaшуpин, И.И. Попов // Когерентная оптика и оптическая спектроскопия: XIX Международная молодежная научная школа 5-7 октября 2015 г.: сборник статей / под ред. М.Х. Салахова. – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2015. – С. 236-237.

A29. Вaшуpин, Н.С. Влияние релаксационных процессов трионов на свойства фемтосекундного фотонного эха / Н.С. Вaшуpин, И.И. Попов, А.У. Бахадуров // Материалы Десятой международной научной школы «Наука и инновации-2015» ISS «SI-2015» / под ред. И. И. Попова, В. А. Козлова, В. В. Самарцева. – Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2015. – С. 55-57.

A30. Вaшуpин, Н.С. Обнаружение эффекта нефарадеевского поворота век-

тора поляризации стимулированного фотонного эха возбуждаемого на трионных состояниях / И.И. Попов, Н.С. Вашурин, С.Э. Путилин [и др.] // Материалы Десятой международной научной школы «Наука и инновации-2015» ISS «SI-2015» / под ред. И. И. Попова, В. А. Козлова, В. В. Самарцева. – Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2015. – С. 58-61.

*Тезисы докладов в сборниках конференций:*

А31. Вашурин, Н.С. Особенности регистрации фемтосекундного фотонного эха в режиме спонтанного параметрического рассеяния [Электронный ресурс] / Н.С. Вашурин, И.И. Попов, С.Э. Путилин [и др.] // Труды школы-семинара «Волны-2012». Секция 3. – 2012. – Режим доступа: <http://waveconf.ru/files/docs/2012/thesis/Section3.pdf>.

А32. Вашурин, Н.С. Сигналы фемтосекундного фотонного эха в неорганических пленках и особенности их регистрации [Электронный ресурс] / Н.С. Вашурин, И.И. Попов, С.Э. Путилин [и др.] // Труды школы-семинара «Волны-2012». Секция 3. – 2012. – Режим доступа: <http://waveconf.ru/files/docs/2012/thesis/Section3.pdf>

А33. Вашурин, Н.С. Эффект сдвига спектра сигналов первичного и стимулированного фотонного эха в полупроводниковых пленках наноразмерной толщины [Электронный ресурс] / Н.С. Вашурин, И.И. Попов, С.И. Никитин [и др.] // Труды школы-семинара «Волны-2013». Секция 7. – 2013. – Режим доступа: <http://waveconf.ru/files/docs/2013/thesis/Section7.pdf>

А34. Вашурин, Н.С. Методика эксперимента по наблюдению сигналов оптических переходных процессов в тонких полупроводниковых пленках / В.Т. Сидорова, Н.С. Вашурин, С.И. Никитин [и др.] // Учен. зап. физ. фак-та Моск. ун-та. –2013. – № 5. – С. 135047(1-2).

А35. Вашурин, Н.С. Фотонное эхо в однослойных и трехслойной полупроводниковых пленках различной наноразмерной толщины и исследование их свойств / И.И. Попов, Н.С. Вашурин, С.И. Никитин [и др.] // Учен. зап. физ. фак-та Моск. ун-та. –2013. – № 5. – С. 135024(1-2).

А36. Вашурин, Н.С. Исследование релаксационных процессов в ансамбле квантовых точек в наноразмерных полупроводниковых пленках на основе фотонного эха [Электронный ресурс] / И.И. Попов, Н.С. Вашурин, С.Э. Путилин [и др.] // Труды школы-семинара «Волны-2014». Секция 3. – 2014. – Режим доступа: <http://waveconf.ru/files/docs/2014/thesis/Section3.pdf>

А37. Вашурин, Н.С. Оптические свойства фотонного эха в наноразмерных функциональных пленках для элементной базы оптоэлектроники [Электронный ресурс] / Н.С. Вашурин, И.И. Попов, С.Э. Путилин // Труды школы-семинара «Волны-2014». Секция 3. – 2014. – Режим доступа: <http://waveconf.ru/files/docs/2014/thesis/Section3.pdf>

А38. Вашурин, Н.С. Технологические особенности получения тонких функциональных пленок для оптоэлектроники и светотехники и результаты их исследования [Электронный ресурс] / И.И. Попов, Н.С. Вашурин, С.Э. Путилин [и др.] // Труды школы-семинара «Волны-2014». Секция 5. –2014. – Режим доступа: <http://waveconf.ru/files/docs/2014/thesis/Section5.pdf>

А39. Вашурин, Н.С. Исследование оптических свойств фотонного эха в наноразмерных полупроводниковых пленках / И.И. Попов, Н.С. Вашурин, С.Э.

Путилин [и др.] // Учен. зап. физ. фак-та Моск. ун-та. – 2014. – № 4. – С. 144328(1-2).

А40. Вашурин, Н.С. Нефарадеевский поворот вектора поляризации стимулированного фотонного эха в тонкой поликристаллической пленке ZnO/Si(P)/Si(B) / И.И. Попов, Н.С. Вашурин, С.Э. Путилин // Учен. зап. физ. фак-та Моск. ун-та. – 2015. – № 4. – С. 154338(1-2).

А41. Вашурин, Н.С. Фотонное эхо и оптическая эхо-спектроскопия экситонных квантовых переходов в тонких поликристаллических пленках / Н.С. Вашурин, И.И. Попов // 12 Международные чтения по квантовой оптике (IWQO-2015). – М.: МПГУ, 2015. – С. 159.

А42. Вашурин, Н.С. Поляризационные свойства и спектроскопические возможности фотонного эха в тонкой пленке ZnO/Si+/Si- при воздействии продольного однородного магнитного поля / И.И. Попов, Н.С. Вашурин, С.Э. Путилин // 12 Международные чтения по квантовой оптике (IWQO-2015). – М.: МПГУ, 2015. – С. 171.

Подписано в печать 22.04.2016.  
Бумага офсетная. Печать офсетная.  
Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ № 5793.

---

Редакционно-издательский центр  
Поволжского государственного технологического университета  
424006, г. Йошкар-Ола, ул. Панфилова, 17